

UDK 624.072.2:624.013.2

Primljeno 7. 4. 2006.

# Povećanje nosivosti spregnutih nosača djelomičnim oblaganjem čeličnog profila betonom

Damir Markulak, Damir Varevac

## Ključne riječi

spregnuti nosač,  
kontinuirani spregnuti  
nosač,  
čelični profil,  
obložni beton,  
djelomično oblaganje,  
nelinearni proračun

## Key words

composite girder,  
continuous composite  
girder,  
steel section,  
encasement concrete,  
partial encasement,  
non-linear analysis

## Mots clés

poutre composite,  
poutre composite et  
continue,  
profilé en acier,  
béton de revêtement,  
revêtement partiel,  
calcul non-linéaire

## Ключевые слова

сопряжённая балка,  
непрерывная балка,  
стальной профиль,  
обложной бетон,  
нелинейный расчёт

## Schlüsselworte

Verbundträger,  
Verbunddurchlaufträger,  
Stahlprofil,  
Vorsatzbeton,  
teilweise Verkleidung,  
unlineare Berechnung

D. Markulak, D. Varevac

Prethodno priopćenje

## Povećanje nosivosti spregnutih nosača djelomičnim oblaganjem čeličnog profila betonom

Opisana su istraživanja razine povećanja nosivosti spregnutih nosača čelik-beton djelomičnim oblaganjem čeličnog profila betonom u područjima unutarnjih ležajeva. Razmatrani su kontinuirani nosači, a spregnuti su valjani čelični nosači i armiranobetonske monolitne ploče konstantne debljine. Rezultati istraživanja pokazuju da se prikazanim načinom osjetnije povećava nosivost spregnutih nosača, što je izraženije pri većim rasponima i upotrebi HE-A čeličnih profila.

D. Markulak, D. Varevac

Preliminary note

## Increase in bearing capacity of composite girders by partial steel-section encasement

The studies of increase in the bearing capacity of steel-concrete composite girders, as obtained by partial steel section encasement with concrete in the zone of internal bearings, are described. Continuous girders are considered, and composite action is applied to rolled steel girders and reinforced-concrete monolithic slabs of constant thickness. The results obtained show that a significant increase in the bearing capacity of composite girders can thus be achieved, and that this increase is even more pronounced in case of greater spans, and when HE-A steel sections are used.

D. Markulak, D. Varevac

Note préliminaire

## Augmentation de la capacité portante des poutres composite par revêtement partiel des profilés en acier

Les études de l'augmentation de la capacité portante des poutres acier-béton composites, par bétonnage partiel du profilé en acier dans la zone occupée par les appareils d'appui internes, sont décrites. Les poutres continues sont prises en considération, et l'action composite est maintenue pour le profilé roulé et pour la dalle monolithique en béton armé d'épaisseur constante. Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation considérable dans la capacité portante des poutres composites peut ainsi être obtenue, et que cette augmentation est encore plus prononcée dans le cas des portées de grandeur considérable, et aussi quand les profilés métalliques en HE-A sont utilisés.

Д. Маркулак, Д. Варевач

Предварительное сообщение

## Повышение несущей способности сопряжённых балок частичном обкладкой стального профиля бетоном

В работе описаны исследования уровня повышения несущей способности сопряжённых балок сталь-бетон частичном обкладкой стального профиля бетоном в местах внутренних опор. Рассматривались непрерывные балки, а сопряжены укатанные стальные балки и железобетонные монолитные плиты постоянной толщины. Результаты исследований показывают, что показанным способом значительно повышается несущая способность сопряжённых балок, что более выразительно при больших пролётах и употреблении HE-A стальных профилей.

D. Markulak, D. Varevac

Vorherige Mitteilung

## Tragfähigkeitserhöhung von Verbundträgern mit teilweiser Verkleidung des Stahlprofils mit Beton

Beschrieben sind Forschungen des Ausmasses der Tragfähigkeitserhöhung von Stahl-Beton-Verbundträgern durch teilweise Verkleidung des Stahlprofils mit Beton im Bereich der Innenlager. Betrachtet sind Durchlaufträger, wobei Walzstahlträger und Stahlbetonmonolithplatten von konstanter Dicke verbunden sind. Die Forschungsergebnisse zeigen dass mit dem dargestellten Verfahren die Tragfähigkeit von Verbundträgern erheblich erhöht wird, was bei grösseren Spannweiten und Anwendung von HE-A Stahlprofilen ausdrucksvoller ist.

Autori: Prof. dr. sc. **Damir Markulak**, dipl. ing. građ.; doc. dr. sc. **Damir Varevac**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

## 1 Općenito

Provedeno je istraživanje razine povećanja nosivosti kontinuiranih spregnutih nosača čelik-beton djelomičnim oblaganjem čeličnog nosača u području unutarnjih ležaja (negativnih momenata savijanja). Razmatraju se spregnuti nosači namijenjeni primjeni u visokogradnji, a usvojen je statički sustav kontinuiranog nosača s dva jednaka raspona. Spregnuti nosači sastavljeni su od IPE ili HE-A valjanih nosača te monolitne armiranobetonske ploče, a tijekom betoniranja nije predviđeno posebno podupiranje čeličnih nosača (ostvaruje se sprezanje samo za korisno opterećenje). Za sprezanje predviđaju se valjkasti moždanici s glavom.

Kod razmatranih kontinuiranih spregnutih nosača posebnu pažnju treba posvetiti području uz unutarnje ležaje, koje je izloženo djelovanju velikih negativnih momenata savijanja i poprečnih sila, a betonska se ploča nalazi u vlačnome području. Stoga je to područje nosača izloženo bitno nepovoljnijim naprezanjima u odnosu na dijelove nosača s pozitivnim momentima savijanja, pa je uglavnom i mjerodavno za dimenzioniranje nosača.

Istraživanje je provedeno u dva dijela. Prvi dio podrazumijeva provedbu normama definiranih proračuna standardnih tipova spregnutih nosača i analizu važnosti pojedinih proračunskih kriterija u postupku dimenzioniranja. Na temelju rezultata iz prvog dijela, u drugome se dijelu razmatraju nosači kod kojih se oblaganje betonom čeličnog nosača obavlja samo u području unutarnjeg ležaja i provodi se ciljani nelinearni proračun otpornosti spregnutoga poprečnog presjeka na negativni moment savijanja kao mjerodavni kriterij nosivosti spregnutog nosača. Pri proračunima je pretpostavljeno ostvarenje pune posmične veze.

## 2 Formulacija cilja istraživanja

Cilj istraživanja jest određivanje razine povećanja nosivosti kontinuiranih spregnutih nosača djelomičnim oblaganjem betonom čeličnog nosača u području negativnih momenata savijanja. Kako je autorima poznato, do sada je objavljeno nekoliko radova koji obrađuju ovu problematiku [3], [4], [5], a općenito se pristup temelji na superponiranju doprinosa otpornosti pojedinih dijelova presjeka (čeličnog, betonskog i armature). Pri tome je više istraživanja provedeno samo za obložene čelične nosače (bez armiranobetonske ploče) [4], za spregnute nosače u području pozitivnih momenata savijanja [3], ili pak za potpuno obložene spregnute nosače [5].

Nelinearnosti pri proračunima otpornosti spregnutih konstrukcija proizlaze iz neelastičnih svojstava materijala i promjena u geometriji konstrukcije. Materijalna nelinearnost odnosi se na bitno drugačije ponašanje dvaju spreg-

nutih materijala – čelika i betona. Tako je beton relativno krhak materijal s različitim ponašanjem pri tlačnom i vlačnom naprezanju, dok je čelik izraziti elasto-plastičan materijal i u tlačnome i u vlačnome području. Također, i ponašanje posmične veze između čelika i betona može bitno pridonijeti nelinearnom ponašanju zbog relativno složene zadaće prijenosa naprezanja između betonskog i čeličnog dijela presjeka. Sadašnje stanje istraživanja nelinearnog ponašanja spregnutih konstrukcija može se podijeliti na više razina, [6], te se tako provode istraživanja na razini poprečnog presjeka, na razini spregnutog elementa, [7], na razini spregnutih priključaka te na razini cijele konstrukcije. Za ovu je fazu istraživanja u ovome radu primijenjena nelinearna analiza na razini poprečnog presjeka primjenom metode diskretizacije poprečnog presjeka u odsječke ili lamele odgovarajuće veličine (eng. *Fiber section model*).

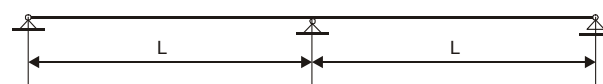
U prvom se koraku provodi normama definirano dimenzioniranje standardnog tipa spregnutih nosača prema [1] uz primjenjivu veličinu raspona, razmaka čeličnih nosača te vrste poprečnog presjeka. Proračuni se provode za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabljivosti s gledišta ograničenja veličine progiba spregnutog nosača.

U drugom se koraku razmatra mogućnost povećanja nosivosti standardnih spregnutih nosača (dimenzioniranih u prvom koraku) djelomičnim oblaganjem betonom čeličnog nosača u području negativnih momenata savijanja. U tome se smislu prethodno dimenzionirani obloženi presjeci iz prvog koraka «pojačavaju» djelomičnim oblaganjem betonom čeličnog nosača i ugradnjom odgovarajuće armature i spona u obloženom betonu, te se potom provodi nelinearna analiza otpornosti poprečnih presjeka iz prvog i drugog koraka (tj. za neobloženi i obloženi poprečni presjek).

## 3 Karakteristike razmatranog tipa spregnutih nosača

### 3.1 Konstrukcijske karakteristike

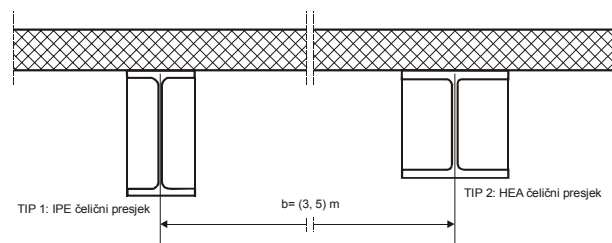
Na slici 1. prikazan je usvojeni statički sustav, a razmatrani su rasponi od 8, 10 i 12 metara. Razmaci između čeličnih nosača su 3 i 5 metara (slika 2.).



Slika 1. Statički sustav razmatranih nosača

Spregnute su nosači sastavljeni od čeličnih valjanih nosača IPE i HE-A poprečnog presjeka, kvalitete materijala S235, a armiranobetonska je ploča monolitna konstantne debljine i kvalitete betona C25/30 (slika 2.). Debljina ploče jest 120 i 150 mm, ovisno o razmaku čeličnih nosača, a ar-

matura ploče u području negativnih momenata je  $\phi$  12/15 cm za ploču debljine 120 mm, i  $\phi$  12/10 cm za ploču debljine 150 mm. Kvaliteta armature u ploči i obložnom betonu je S 420 s granicom popuštanja  $f_{sk} = 420 \text{ N/mm}^2$  i modulom elastičnosti  $E_s = 210 \text{ kN/mm}^2$ . Nije predviđeno podupiranje čeličnih nosača tijekom betoniranja ploče.



Slika 2. Tipovi spregnutih presjeka i razmaci čeličnih nosača

Normama određen proračun otpornosti spregnutih nosača proveden je za fazu izvedbe i za fazu uporabe. Proračun momenata savijanja i poprečnih sila čeličnih nosača za fazu izvedbe izvršen je prema teoriji elastičnosti, dok je otpornost poprečnih presjeka proračunana prema teoriji plastičnosti (svi razmatrani presjeci bili su razvrstani kao razred 1 ili 2). Razmatrana je i bočna stabilnost nosača pri čemu su usvojene sljedeće pretpostavke:

- na svim se osloncima nalaze bočna pridržanja
- u području pozitivnih momenata pridržanje gornje čelične pojasnice osigurano je izvedbom oplata za betoniranje ploče koja je dodatno dostatno ojačana za tu svrhu
- u području negativnih momenata kontrolira se otpornost donje pojasnice čeličnog nosača na bočno izvijanje.

Proračun momenata savijanja i poprečnih sila nosača za fazu uporabe proveden je prema teoriji elastičnosti za «neraspucali» presjek, ali su naknadno preraspodijeljeni

momenti savijanja u skladu s [1]. Za granično stanje nosivosti kontrolirana je otpornost kritičnih poprečnih presjeka na savijanje, posmik te interakciju savijanja i posmika, a otpornost nosača na bočno izvijanje tretirana je u skladu s točkom 6.4.3 u [1]. Vlačna je otpornost armature u području proračunske širine ploče uzeta u obzir pri proračunu otpornosti na savijanje u području negativnih momenata, a os armature nalazi se 30 mm od gornjeg ruba ploče.

Kontrola graničnog stanja uporabljivosti provedena je sa stajališta ograničenja progiba (na vrijednost  $L/250$ ), pri čemu je uključen utjecaj raspucavanja betona te mogućnost plastifikacije čeličnog presjeka u području negativnih momenata savijanja (točka 7.3.1. [1]). Utjecaj dugotrajnih deformacija betona uzet je u obzir redukcijom modula elastičnosti betona na aproksimativnu vrijednost  $E_{cm}/3$ , gdje je  $E_{cm}$  modul elastičnosti betona za kratkotrajno opterećenje. Ukupni progib nosača dobiven je superpozicijom progiba proračunanog za stanje izvedbe i stanje uporabe.

Na temelju prethodno navedenih pretpostavki proveden je normama određen proračun otpornosti neoboženih spregnutih nosača uz mijenjanje raspona, razmaka nosača i tipa poprečnog presjeka, dok je odgovarajuće uporabno opterećenje uzeto prema [8] za razred zgrada B (uredske prostorije) s karakterističnom vrijednošću od  $3,0 \text{ kN/m}^2$ . Rezultati dimenzioniranja i oznake pojedinih nosača prikazani su u tablici 1.

### 3.2 Ocjena važnosti kriterija za dimenzioniranje

Na osnovi provedenih proračuna nosača analizira se važnost pojedinog kriterija za dokazivanje dostatne sigurnosti nosača radi utvrđivanja kritičnih zahtjeva koji uvjetuju dimenzije nosača. Važnost pojedinog kriterija ovdje je procijenjena iz omjera odgovarajuće proračunske otpor-

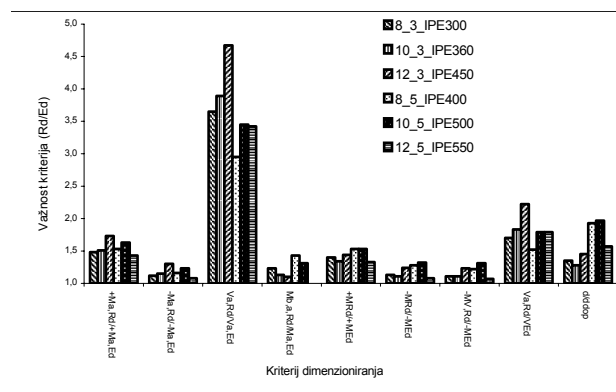
Tablica 1. Rezultati proračuna

tip 1: IPE		L = 8,0 m	L = 10,0 m	L = 12,0 m
razmak nosača b = 3,0 m	čelični presjek	IPE 300	IPE 360	IPE 450
	debljina ploče	120 mm	120 mm	120 mm
	oznaka	8 3 IPE300	10 3 IPE360	12 3 IPE450
razmak nosača b = 5,0 m	čelični presjek	IPE 400	IPE 500	IPE 600
	debljina ploče	150 mm	150 mm	150 mm
	oznaka	8 5 IPE400	10 5 IPE500	12 5 IPE600
tip 2: HEA		L = 8,0 m	L = 10,0 m	L = 12,0 m
razmak nosača b = 3,0 m	čelični presjek	HEA 240	HEA 300	HEA 320
	debljina ploče	120 mm	120 mm	120 mm
	oznaka	8 3 HEA240	10 3 HEA300	12 3 HEA320
razmak nosača b = 5,0 m	čelični presjek	HEA 320	HEA 360	HEA 450
	debljina ploče	150 mm	150 mm	150 mm
	oznaka	8 5 HEA320	10 5 HEA360	12 5 HEA450

nosti i pripadnog proračunskog utjecaja prema pojedinom kriteriju. Na slikama 3. i 4. grafički je predložena važnost pojedinog kriterija proračunata na ovaj način pri postupku dimenzioniranja za tipove 1 i 2 razmatranih spregnutih nosača. Uporabljene su sljedeće oznake:

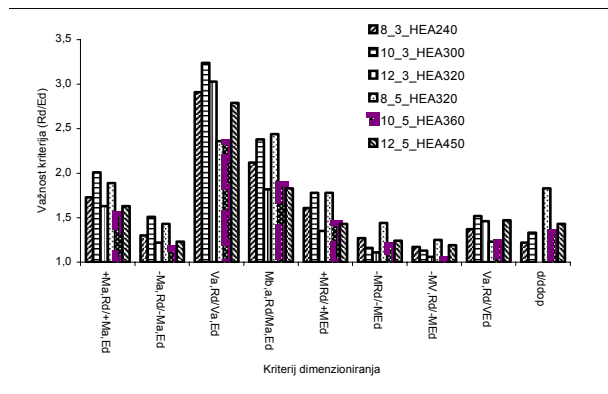
- $+M_{a,Rd}$  - proračunska otpornost čeličnog presjeka na pozitivni moment savijanja
- $-M_{a,Rd}$  - proračunska otpornost čeličnog presjeka na negativni moment savijanja
- $V_{a,Rd}$  - proračunska otpornost čeličnog presjeka na poprečnu silu
- $M_{b,a,Rd}$  - otpornost čeličnog elementa na bočno izvijanje zbog negativnog momenta savijanja
- $+M_{Rd}$  - proračunska otpornost spregnutog presjeka na pozitivni moment savijanja
- $-M_{Rd}$  - proračunska otpornost spregnutog presjeka na negativni moment savijanja
- $M_{V,Rd}$  - proračunska otpornost spregnutog presjeka na interakciju savijanja i poprečne sile
- $d$  - proračunani ukupni progib spregnutog nosača
- $d_{dop}$  - dopušteni progib spregnutog nosača ( $L/250$ )
- $+M_{a,Ed}$  - mjerodavni pozitivni proračunski moment savijanja na čelični nosač (faza izvedbe)
- $-M_{a,Ed}$  - mjerodavni negativni proračunski moment savijanja na čelični nosač (faza izvedbe)
- $+M_{Ed}$  - mjerodavni pozitivni proračunski moment savijanja na spregnuti nosač (faza uporabe)
- $-M_{Ed}$  - mjerodavni negativni proračunski moment savijanja na spregnuti nosač (faza uporabe)
- $V_{Ed}$  - mjerodavna proračunska poprečna sila na spregnuti nosač (faza uporabe)

Na slici 3. može se vidjeti da su otpornost presjeka na negativni moment savijanja, i u fazi izvedbe i u fazi upora-



Slika 3. Važnost kriterija za dokaz sigurnosti za Tip 1 nosača

be, uz otpornost elementa na bočno izvijanje dominantni kriteriji koji određuju dimenzije čeličnog, odnosno spregnutog nosača. Zbog relativno debelih hrptova postoji dostatna otpornost na poprečne sile, te ni smanjenje otpornosti na savijanje zbog interakcije savijanja i posmika kod IPE nosača ne utječe bitno na dimenzije nosača. Otpornost na pozitivne momente savijanja, kao ni veličina progiba nosača nisu kritični kriteriji te u presjecima, odnosno elementima postoje određene rezerve kod ovog tipa nosača.



Slika 4. Važnost kriterija za dokaz sigurnosti za Tip 2 nosača

Usporedbom slika 3. i 4. mogu se uočiti određene razlike u važnosti pojedinih kriterija za presjeka s HEA presjecima u odnosu na presjeka tipa 1. Kod ovih presjeka bočno izvijanje nosača u fazi izvedbe nije kritično, a i otpornost na negativne momente savijanja je u fazi izvedbe nosača (čelični presjek) nešto veća u odnosu na kasniju otpornost spregnutog presjeka. Zbog relativno malih visina hrptova kod takvih je nosača mjerodavan kriterij za dimenzioniranje nosača otpornost spregnutog presjeka na interaktivno djelovanje momenta savijanja i poprečne sile. Također, kriterij progiba kod ove je vrste nosača važniji. Rezerve presjeka u području pozitivnih momenata savijanja su znatne.

Konačno se može zaključiti da je i kod jedne i kod druge vrste nosača otpornost na negativni moment savijanja kritična za dimenzioniranje nosača, a da kod otpornosti na pozitivni moment savijanja postoje znatne rezerve. Utjecaj interakcije savijanja i posmika je kod HEA čeličnih nosača znatniji te je smanjenje otpornosti na negativni moment savijanja zbog toga utjecaja oko 15% za promatrane nosače. Kod IPE nosača smanjenje nosivosti je vrlo malo i kreće se oko 3-4%.

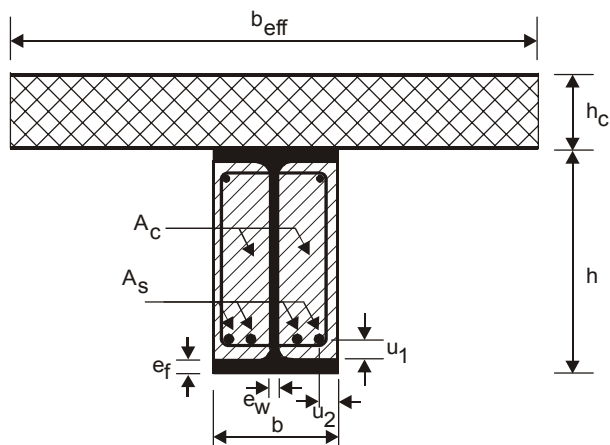
Na temelju ovih razmatranja provest će se istraživanje mogućnosti povećanja nosivosti prethodno dimenzioniranih neobloženih spregnutih nosača oblaganjem betonom čeličnog presjeka samo u području negativnih momenata savijanja, budući da je to kritično područje za promatrane nosače.



#### 4 Analiza doprinosa obložnog betona na otpornost spregnutog nosača na savijanje

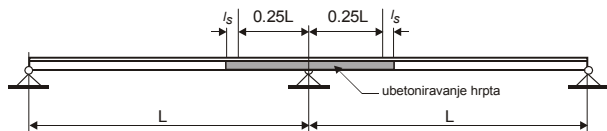
##### 4.1 Konstrukcijsko oblikovanje

Da bi se područje obloženo betonom oko hrptova čeličnih nosača pri proračunu otpornosti moglo uzimati u obzir moraju biti zadovoljeni određeni konstrukcijski zahtjevi, npr. odgovarajući postotak armiranja, povezivanje s hrptom čeličnog nosača, duljina sidrenja, zaštitni sloj betona i sl. Ti su uvjeti navedeni u [1] i [2], te se pri koncipiranju spregnutih nosača za istraživanja u ovome radu o tim uvjetima vodilo računa, slika 5. Na taj je način moguće dobiti i povećanu požarnu otpornost takvih spregnutih nosača, posebice zbog mogućnosti tretiranja sustava kao kontinuiranog nosača pri proračunu otpornosti na požar, što u slučaju spregnutih nosača s neobloženim hrptovima nije moguće zbog opasnosti od pojave lokalnih izbočivanja čeličnog presjeka u području priključaka. Za potpuno iskorištavanje ovih prednosti trebalo bi na odgovarajući način povećati i požarnu otpornost neobloženih područja čeličnog nosača (u skladu s proračunom požarne otpornosti cijelog nosača).



Slika 5. Oznake dijelova djelomično obloženog presjeka

Na slici 6. prikazano je predviđeno područje oblaganja i armiranja čeličnog nosača, gdje je s  $l_s$  označena duljina sidrenja predviđene armature u obložnom betonu.

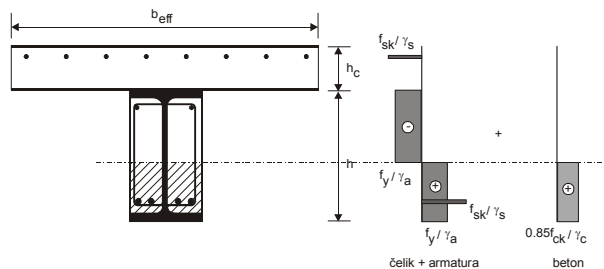


Slika 6. Prikaz područja oblaganja hrptova čeličnih nosača

##### 4.2. Pretpostavke za proračun otpornosti djelomično obloženog presjeka

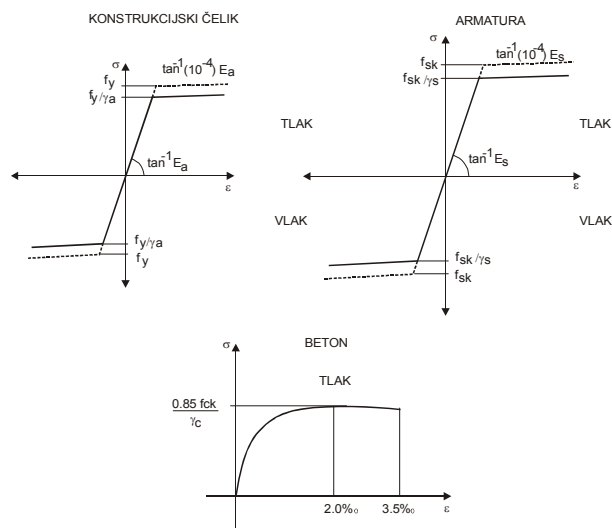
Na slici 7. prikazana je pretpostavljena raspodjela naprezanja na dijelove presjeka u slučaju da je moguće

ostvarivanje potpune plastične otpornosti presjeka za negativni moment savijanja.



Slika 7. Potpuna plastifikacija djelomično obloženog presjeka pri negativnom savijanju

Međutim, nije uvijek moguće postignuti istodobnu plastifikaciju svih dijelova presjeka. Stoga su u ovome radu primijenjeni nelinearni modeli ponašanja materijala prikazani na slici 8. Na taj je način moguće ustanoviti realniju raspodjelu naprezanja u dijelovima presjeka, te uočiti slijed i kapacitet plastifikacije pojedinih dijelova presjeka, što je u slučaju takvih presjeka vrlo važno. Naime, u slučajevima kada se želi samo pojačati nosivost neobloženih spregnutih nosača naknadnim oblaganjem hrptova (npr. pri sanacijama i sl.), ta činjenica ne mora biti ključna ako se radi o razredima presjeka 1 i 2, za koje je moguće ostvarivanje pune plastifikacije i čime se vjerojatno računalo pri izvornom proračunu neobloženih nosača. Međutim, ako se već pri dimenzioniranju nosača iskorištavaju sve plastične rezerve obloženih spregnutih nosača, tada je bitno može li se ta pretpostavljena plastifikacija zapravo i dogoditi, budući da će to ovisiti o dimenzijama presjeka, količini i razmještaju armature i sl., kako se može uočiti i iz rezultata ovih istraživanja.

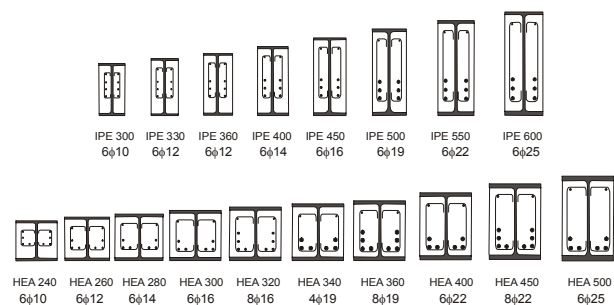


Slika 8. Proračunski radni dijagrami materijala primijenjeni pri proračunu

Deformacija čelika praktički je neograničena, dok se deformacija betona ograničava na 3,5 ‰. Za proračun

otpornosti presjeka upotrijebljen je programski paket *Xtract*, [9], a pri proračunu se poprečni presjek obložena spregnutog nosača diskretizira na određeni broj odsječaka ili lamela te se u skladu sa zadanim radnim dijagramima materijala pri proračunu naprezanja «integriraju» duž poprečnog presjeka (tzv. *Fiber Section Model*). Moguće je kontrolirati tijek proračuna tako da se on može zaustaviti ako se ispuni neki od unaprijed zadanih zahtjeva – granična vrijednost deformacije, prekoračenje određenog naprezanja i sl., što je bitno upravo zbog kontrole stupnja plastifikacije koja se do ispunjavanja toga zahtjeva dogodila.

Proračun otpornosti na negativni moment savijanja proveden je za djelomično obložene spregnute presjeke s čeličnim nosačima definiranim u tablici 1., te za djelomično obložene spregnute presjeke s prvim manjim valjanim čeličnim presjekom od prethodno navedenih, kako bi se bolje ocijenila razina povećane nosivosti djelomično obloženih nosača. Stoga je proračun izvršen za ukupno 24 spregnuta nosača (po 12 za svaki tip presjeka). Skica razmatranih poprečnih presjeka s ucrtanom količinom i položajem armature prikazana je na slici 9.



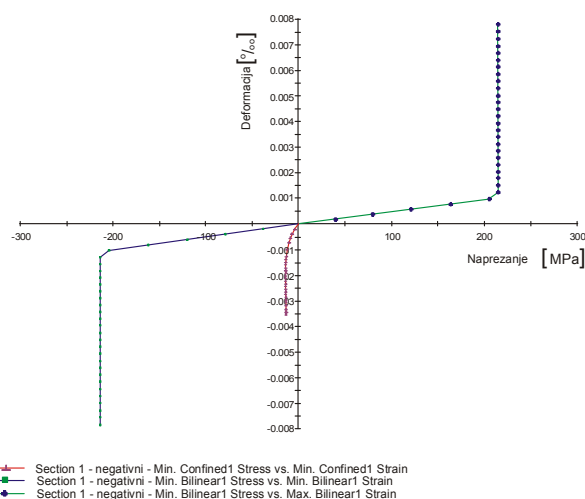
Slika 9. Armiranje djelomično obloženih čeličnih nosača

## 5. Rezultati istraživanja

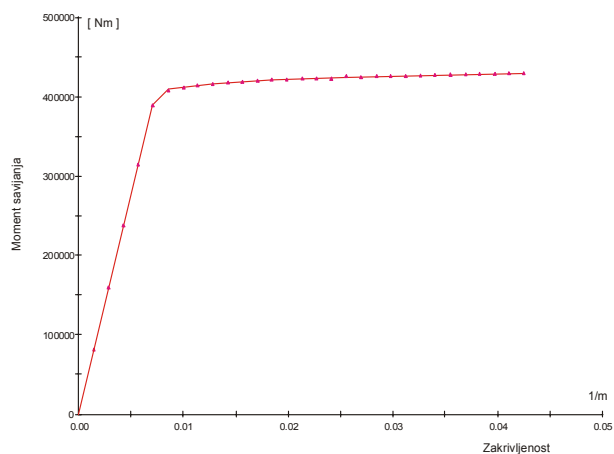
Provedena je analiza otpornosti djelomično obloženih spregnutih poprečnih presjeka sa slike 9. na negativni moment savijanja. Provedenim proračunima za svaki su presjek proračunani:

- krivulja  $M-\phi$  presjeka,
- moment savijanja u trenutku početka plastifikacije materijala
- granični moment savijanja presjeka,  $M_{Rd}$
- položaj neutralne osi pri dosegnutoj graničnoj otpornosti presjeka na savijanje.

Također je bilo moguće pratiti slijed plastificiranja pojedinih dijelova presjeka do dosezanja granične otpornosti. Primjerice, na slikama 10. i 11. prikazani su neki rezultati proračuna za presjek 10\_3\_HEA300.

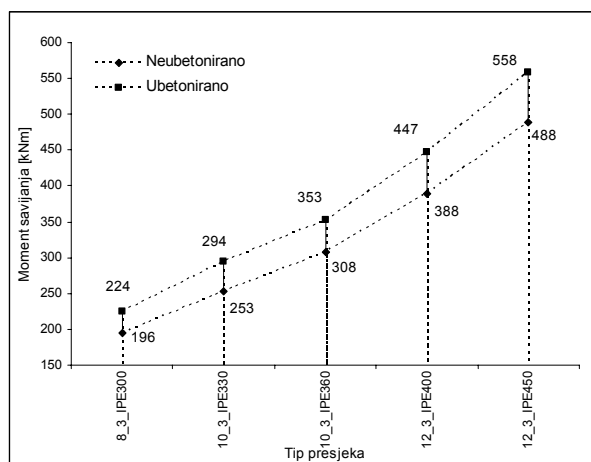


Slika 10. Slijed naprezanja u čeličnom profilu i betonu na obloženom dijelu čeličnog presjeka tijekom proračuna otpornosti

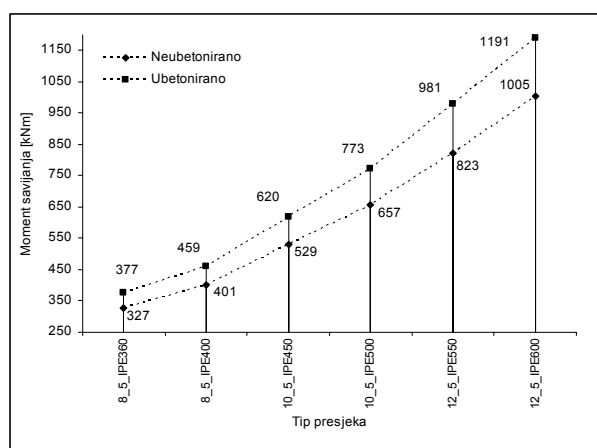


Slika 11. Krivulja moment-rotacija presjeka 10\_3\_HEA300

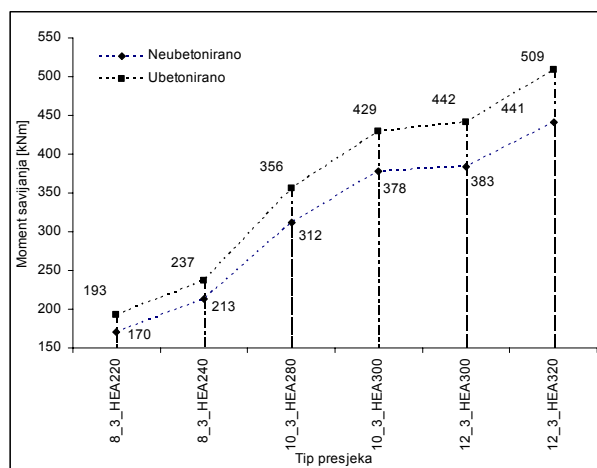
Na slikama 12. do 15. prikazani su dosegnuti granični proračunski momenti otpornosti na negativni moment savijanja neobloženih i djelomično obloženih spregnutih presjeka.



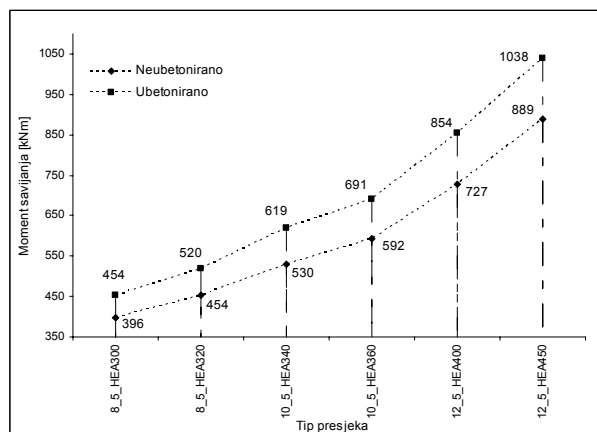
Slika 12. Otpornost spregnutih nosača s IPE presjekom, razmak 3 m



Slika 13. Otpornost spregnutih nosača s IPE presjekom, razmak 5 m



Slika 14. Otpornost spregnutih nosača s HEA presjekom, razmak 3 m



Slika 15. Otpornost spregnutih nosača s HEA presjekom, razmak 5 m

Postotak armiranja betonom obloženog područja u analiziranim je slučajevima iznosio oko 1,5 – 2,5 %, što je ovisilo o mogućnosti smještanja armature – postizanju traženih udaljenosti od donje pojasnice čeličnog presjeka, zaštitnog sloja betona, mogućnosti ugradnje betona i sl.

Sa slika 12. do 15. može se vidjeti da je računaska otpornost na savijanje kod tipa 1 presjeka (IPE presjeci) povećana prosječno 15%, dok je kod tipa 2 presjeka (HEA presjeci) otpornost povećana nešto više i kreće se oko 18-19%.

Proveden je i ponovljeni statički proračun i preraspodjela reznih sila za povećano stalno opterećenje zbog obložnog betona u okolini unutarnjeg ležaja. Rezultati pokazuju da se povećanje negativnog momenta nad unutarnjim ležajem za promatrane primjere kreće od 1 do najviše 2%, što je zanemarivo.

Osim povećanja otpornosti na savijanje, jasno je da zaštitni beton povećava i otpornost presjeka na poprečnu silu. Prema preporukama u [1], u nedostatku točnijih analiza moguće je pojednostavnjeno uzeti da se raspodjela poprečne sile  $V_{Ed}$  na čelični  $V_{a,Ed}$  i betonski dio  $V_{c,Ed}$  može uzeti analogno udjelu otpornosti na savijanje čeličnog presjeka odnosno armiranog obloženog dijela u ukupnoj otpornosti spregnutog nosača na moment savijanja  $M_{pl,Rd}$  (pod uvjetom da je obloženi dio propisno armiran uzdužnom i poprečnom armaturom). Međutim, ovo bi povećanje otpornosti još trebalo istražiti s obzirom na to da se beton nalazi u svojevrsnom čeličnom «kalupu» te u različitim stanjima naprezanja gledajući po širini čeličnog nosača [10].

Preliminarnim proračunom nosivosti obložnog betona na poprečnu silu u skladu s HRN ENV 1992 (uzeta nosivost betonskog presjeka na poprečnu silu  $V_{Rd,1}$  te nosivost vertikalnih spona  $V_{wd}$ ), može se pokazati da povećanje nosivosti djelomično obloženog spregnutog presjeka iznosi oko 15-20%, ali ne treba zanemariti ni stabilizirajući utjecaj na hrbat čeličnog profila što, vjerojatno, uz spomenuti efekt «ugrađenog» betona dovodi i do većih poboljšanja prijenosa poprečne sile.

Treba još napomenuti da je u većini slučajeva prvo došlo do iscrpljenja plastičnih rezerva betona u obloženom dijelu čeličnog presjeka i nije se postigla puna plastifikacija armature u obloženom dijelu čeličnog profila. Ova je činjenica vrlo važna jer pokazuje da pretpostavljeni model potpune plastifikacije svih dijelova obloženoga spregnutoga poprečnog presjeka u nekim slučajevima nije moguće ispuniti. Kako je već prije istaknuto, raspucavanje obložnog betona još uvijek ne znači potpuno otkazivanje nosivosti spregnutog presjeka, no i iz ovih se istraživanja moglo vidjeti da to ipak dovodi do osjetnog smanjenja nosivosti presjeka, što u slučaju visoko iskorištenih rezervi spregnutog nosača može imati važnu ulogu u daljnjem ponašanju spregnutog nosača. Kod većih dimenzija presjeka, poglavito HEA presjeka, stupanj plastifikacije bio je osjetno veći te je redovito dolazilo do plastifikacije većeg broja šipki armature.

## 6 Zaključak

U radu je istraživana mogućnost povećanja nosivosti neobloženih kontinuiranih spregnutih nosača djelomičnim oblaganjem čeličnog nosača u području negativnih momenata savijanja.

Osim već poznatih povoljnih utjecaja od djelomičnog oblaganja čeličnog profila (kao što su preventivno djelovanje betona na povećanje požarne otpornosti, povećanje otpornosti na izbočivanje hrpta te bočno izvijanje itd.), provedenim je istraživanjima kvantitativno ocijenjeno povećanje nosivosti u odnosu na spregnute nosače s neobloženim čeličnim presjecima. Otpornost odabranih poprečnih spregnutih presjeka proračunana je primjenom nelinearnih proračuna. Pokazano je da bi se u pojedinim slučajevima nosača umjesto potrebnoga neobloženog čeličnog nosača mogao iskoristiti manji djelomično obloženi poprečni presjek što u konačnici vodi k racionalnijem utrošku materijala. Također, rezultati istraživanja pokazuju da se nosivost djelomično obloženih spregnutih nosača znatnije povećava s povećanjem raspona u odnosu na neobložene spregnute nosače – ovo

vrijedi i za IPE i HE-A čelične nosače. Povećanje nosivosti poprečnog presjeka na negativni moment savijanja u odnosu na poprečni presjek odgovarajućeg neobloženog spregnutoga nosača iznosi i do 19%. Potom, primijećeno je da se pretpostavljena «idealna» plastična raspodjela naprezanja, odnosno plastifikacija cijeloga spregnutoga poprečnog presjeka u nekim slučajevima ne može ostvariti (pogotovu kod viših IPE nosača), jer prije dolazi do raspucavanja obložnog betona, a time se dovodi u pitanje daljnja plastifikacija armature u razmatranim slučajevima.

U daljnjim bi istraživanjima trebalo razmotriti najpovoljniji postotak armiranja betonom obloženog dijela, najpovoljniji razmještaj armature u tom dijelu i sa stajališta povećanja nosivosti (i ostvarenog stupnja plastifikacije) i s gledišta povećanja požarne otpornosti, efikasnost pojedinog načina povezivanja obložnog betona s hrptom čeličnog nosača (zavarivanje spona, bušenje hrpta, poprečni smještaj moždanika i sl.), utjecaj oblaganja čeličnog nosača na povećanje indeksa pouzdanosti neobloženih spregnutih presjeka (raspucavanje betona u obložnom betonu još ne znači otkazivanje nosača) i sl.

## LITERATURA

- [1] CEN – European Committee for Standardisation: *prEN 1994-1-1:2002, Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*, Brussels 2002
- [2] CEN – European Committee for Standardisation: *ENV 1994-1-2:1994, Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures - Part 1-2 : General rules – Structural fire design*, Brussels 1994
- [3] Kindmann, R.; Bergmann, R.; Cajot, L.-G., Schleich, J.B.: *Effect of Reinforced Concrete Between the Flanges of the Steel Profile of Partially Encased Composite Beams*, Journal of Constructional Steel Research 27 (1993), 107-122
- [4] Hanawa, Y.; Bergmann, R.: *Analytical study on the shearing force share of I-shaped beam with reinforced concrete between flanges*, Stahlbau 69 (2000), Heft 3, 184-190
- [5] Weng, C.C.; Yen, S.I.; Jiang, M.H.: *Experimental Study on Shear Splitting Failure of Full-Scale Composite Concrete Encased Steel Beams*, Journal of Structural Engineering, (2002), 1186-1194
- [6] Spacone, E.; El-Tawil, S.: *Nonlinear analysis of Steel-Concrete Composite Structures: State of the Art*, Journal of Structural Engineering (2004), 159-168
- [7] Fragiocomo, M.; Amadio, C.; Macorin L.: *Numerical Evaluation of Long-term behaviour for continuous steel-concrete composite beams*, Proceedings of International conference on Steel Structures of the 2000's, 2000, Istanbul, 137-142
- [8] CEN – European Committee for Standardisation: *EN 1991, Eurocode 1 – Action on Structures*, Brussels, 2001
- [9] XTRACT – Cross Sectional Analysis of Structural Components, Imbsen software systems, Manual
- [10] Hegger, J.; Goralski, C.: *Structural Behavior of partially concrete encased composite sections with high strength concrete*, Proceedings of the 5th International Conference Composite construction in steel and concrete V, 2004, The Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineering, Berg-en-Dal, South Africa, 2004
- [12] ECCS, Technical publication No. 72: *Composite beams and columns to Eurocode 4*, 1993
- [13] Markulak D.: *Probabilistička ocjena razine sigurnosti cestovnih spregnutih mostova*, disertacija, Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb 2001.
- [14] Džeba, I.: *Nepouzdanost računskih modela otpornosti spregnutih nosača u visokogradnji*, disertacija, Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb 1996.